

УДК 551.144

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРСТОВОГО ПРОЦЕССА В УСЛОВИЯХ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ И АНТРОПОГЕННОЙ АКТИВИЗАЦИИ КАРСТА

Вахрушев Б. А., Вахрушев И. Б.

*Таврическая академия ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени
В. И. Вернадского», г. Симферополь, Российская Федерация
E-mail: vakhb@inbox.ru*

Рассматриваются проблемы моделирования карстового процесса для территорий интенсивного хозяйственного освоения. Выделяется две группы методов моделирования: мысленное, объединяющее теоретические построения, и материальное, где процессы и явления воспроизводятся на объектах, найденных в природе (натурное моделирование) или на специальных объектах, созданных в лабораторных условиях (лабораторное моделирование). Приводятся примеры различных видов моделей, которые могут использоваться для выяснения особенностей и прогнозирования антропогенной активизации карста.

Ключевые слова: карст, моделирование, антропогенная активизация карста, карстоопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Карстовый процесс и обусловленные им явления обладают сложной пространственной, морфологической, временной и динамической структурой. Кроме того, карст в своем развитии включает механизмы парагенетических взаимодействий, инициируя гравитационные, суффозионно-просадочные, оползневые, эрозионные и другие негативные инженерно-геологические процессы. В связи с этим сложность изучения карста в естественных условиях, непредсказуемость его поведения (в т. ч. и парагенетически связанных с ним явлений) при антропогенном воздействии и необходимость при этом давать инженерно-геологический прогноз развития ситуации привели ко все более возрастающему использованию в карстоведении методов моделирования [1].

В данной работе приводится анализ основных методов моделирования в карстоведении, которые могут быть использованы при оценке карстоопасности и антропогенной активизации карста.

Проведенные исследования показывают, что большинство моделей карстового процесса воспроизводят одно-два условия развития карста. Имеются большие противоречия в результатах моделирования, связанные с моделями построенных на разных теоретических признаках, конструкциях, используемых эквивалентных материалах, поставленных граничных условиях и др. Такое положение вещей настоятельно требует создания единого методического центра по моделированию карстовых процессов и форм в инженерно-геологических, гидрогеологических целях, создание базы данных с последующими обобщениями и обработкой полученных результатов. Особенно эти проблемы актуальны для Республики Крым, где более 80 % территории занято карстующимися породами, подверженными интенсивному антропогенному воздействию.

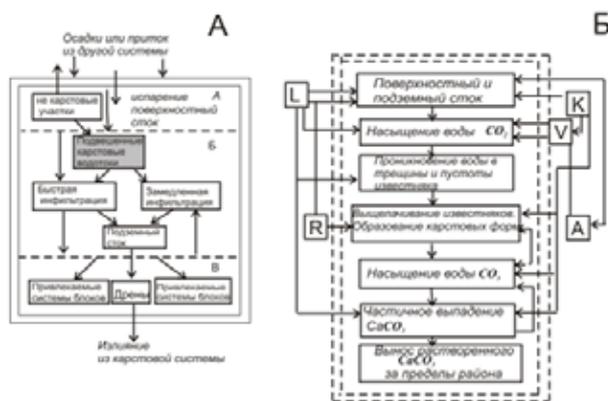
Все методы моделирования, используемые в отечественном и зарубежном карстоведении, можно разделить на две большие группы: мысленную, объединяющую теоретические построения, и материальную, где процесс или явление воспроизводятся на объектах, найденных в природе (натурное моделирование) или на специальных моделях (лабораторное моделирование).

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Мысленное моделирование. Логические модели. В логических моделях структура и взаимосвязи разных сторон процесса излагаются в качественной или полуколичественной форме в виде гипотез, теоретических концепций или блок-схем. В карстологии до последнего времени преобладали модели-гипотезы и модели-теории, в которых развитие карстового процесса или формирование карстовых полостей и ослабленных раскарстованных зон моделировалось на основе представлений об одно- или многоцикловом развитии рельефа, о наличии в горном массиве единого уровня карстовых вод или изолированных водотоков и пр. Применительно к проблемам спелеогенеза этот вид моделирования детально рассмотрен в обзоре [2, 3]. Динамика развития карстовых провалов рассмотрена в мысленных моделях [4, 5].

В последние годы в России и за рубежом отмечается тенденция к построению блок-схем природных процессов. В зависимости от целей и задач исследований они имеют различную теоретическую основу, структуру и название: блок-схема, отражающая взаимоотношения между отдельными геодинамическими зонами [6] (Рис. 1.А); блок-схема карстового процесса, учитывающая влияние геологических, климато-ландшафтных условий и антропогенных воздействий [7] (Рис. 1.Б); «закономерная» модель карстового процесса, которая при изучении конкретного гидрогеологического или инженерно-геологического объекта должна объединяться с его «структурно-закономерной» моделью [8] (Рис. 2).

При изучении карстоопасности и антропогенной активизации карста логическое моделирование обычно предваряет все остальные виды моделирования, формируя концепцию о механизме явления, основных условиях и факторах прохождения процесса и влияния антропогенных факторов на карст.



А) блок-схема карстовой системы, подсистемы: а – поверхность; б – инфильтрация; в – затопленного карста.
 Б) блок-схема карстового процесса: R – сложившийся рельеф; L – состав пород; K – ландшафтно-климатические условия; V – растительность; А – хозяйственная деятельность человека.

Рис. 1. Блок-схема карстовой системы и карстового процесса.

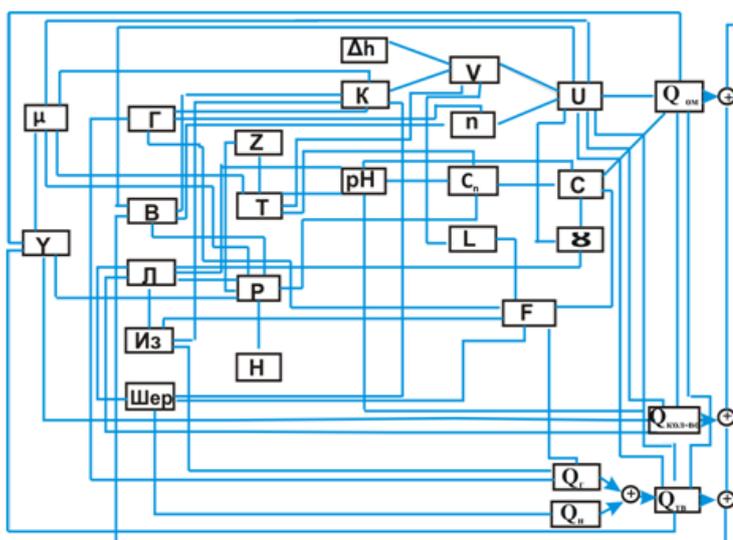


Рис. 2. Закономерная модель карстового процесса. М – вязкость воды; δ – плотность воды; Γ – густота трещиноватости; v – раскрытие трещин, Л – литология; Из – извилистость; Шер – шероховатость; z – глубина от поверхности земли; t – температура; Р – давление; Н – напор; Δh – градиент напора; К –

коэффициент фильтрации; Π – пористость; C_n – равновесная концентрация; L – длина линии тока; F – поверхность растворения; u – скорость течения подземных вод; C – текущая концентрация; γ – коэффициент массоотдачи; Q_n – расход твердых частиц в виде нерастворимого остатка; $Q_{ион}$ – ионный расход; $Q_{колл}$ – коллоидный расход; Q_r – расход твердых частиц в виде гальки растворимой породы; $Q_{тв}$ – расход твердых частиц.

Знаковые модели. В знаковых моделях связи между геологическими образованиями и их свойствами выражаются в графической форме, причем на модели сохраняются взаимоотношения натуральных прототипов. В карстологии к знаковым моделям относятся карстологические карты, карты карстоопасности и антропогенной активизации, разрезы, планы и профили карстовых полостей, а к объемным – блок-диаграммы и макеты (Рис. 3). Знаковым моделям присуща изоморфность (геометрическое подобие) и избирательная подобность. В литературе имеются достаточно четкие рекомендации по построению карстологических знаковых моделей. Вместе с тем ряд вопросов (масштабные и внemasштабные условные знаки, содержание серии карстологических карт, нагрузка карстолого-геоморфологических карт и пр.) нуждается в дальнейшей разработке [9].

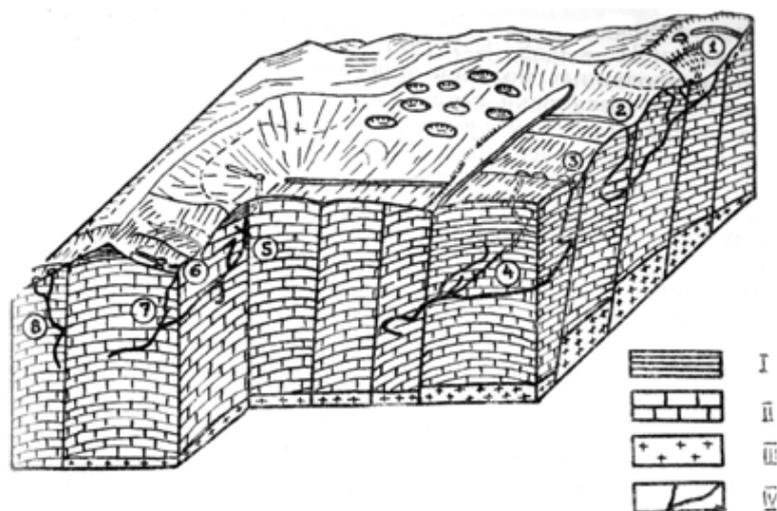


Рис. 3. Блок-диаграмма карстового массива Алек. I – некарстующиеся отложения палеогена; II – верхнеюрские известняки; III – среднеюрские порфиристы; IV – карстовые полости: 1 – пещера Географическая; 2 – пещера Девичья; 3 – пещера Величественная; 4 – пещерная система Назаровская-

Примусная-Осенняя; 5–7 – пещерная система Ручейная-Заблудших; 6 – пещера Школьная; 8 – пещера ТЕП.

Знаковые модели могут иллюстрировать отдельные положения, содержащиеся в логических моделях, но могут иметь и самостоятельное эвристическое или прогнозное значение (оценка условий строительства или эксплуатации инженерных сооружений, определение вероятных связей между поверхностными и подземными водотоками и пр.), особенно на урбанизированных территориях Крыма.

Математические модели. В инженерной карстологии известно довольно много попыток применения детермированных моделей, представленных уравнениями любого вида, кривыми, графиками [10, 11]. В качестве примера можно привести зависимости между площадью входного отверстия в колодцы и шахты нивально-коррозионного класса (S) и их глубиной (H). Для карстовых полостей Горного Крыма в диапазоне глубин 10–100 м она выражена уравнением $H=0,5S+7$ [10, 11].

В последние годы, в связи с накоплением материалов массовых замеров и стационарных наблюдений, получили развитие статистические (стохастические) модели. Они представляют собой уравнения парной и множественной корреляции, кривые нормального, логнормального, гамма, биномиального распределений, статистики (средние арифметические, коэффициенты вариации) и пр. В литературе известны многочисленные примеры разработки статистических моделей распределения коррозионных и провальных карстовых воронок по форме и размерам в различных по текстуре известняках, распределения карстовых полостей по глубине, объему, микроклиматическим условиям и пр. [12]. Наметилось и такое интересное направление инженерно-карстологической оценки закарстованности различных территорий, как сравнение статистических моделей математическими методами (N – критерий, λ – критерий и пр.) [10]. Особую ветвь математического моделирования представляют собой вероятностные и экспериментально-балльные модели карстоопасных территорий, используемые для оценки степени их устойчивости [13].

Математическое моделирование занимает промежуточное положение между мысленным и материальным моделированием. Статистические модели часто представляют собой статистико-вероятностное отражение той или иной логической модели или отдельных звеньев блок-схем. Детерминированные модели используются также при обработке материалов натурного и в особенности лабораторного моделирования. Их примеры будут приведены ниже.

Материальное (физическое) моделирование. Натурное моделирование. В инженерной карстологии различают модели-аналоги, модели полевого опыта, модели-производственные эксперименты [14, 15].

Модели-аналоги – это природные комплексы, детальное изучение которых дает все необходимые данные для переноса (распространения) полученной информации на другие подобные объекты. В карстологии это – спелеологические стационары. Самый информативный случай – когда пещера располагается на выходе карстовой водоносной системы, и комплексные

наблюдения в ней сочетаются со стандартными гидрогеологическими наблюдениями. Это самый перспективный путь натурального моделирования, которым широко пользуются за рубежом [16]. В России подобных стационаров пока нет, хотя в качестве моделей-аналогов могут быть использованы пещеры Красная (Крым), Воронцовская (Зап. Кавказ), Кунгурская, Б. Курманаевская (Урал) и пр. Преимущество моделей-аналогов – масштабный коэффициент, близкий к единице, значительная (часто измеряемая в шкале геологического времени) длительность прохождения тех или иных процессов; недостаток – плохая управляемость, невозможность активного воздействия на ход и условия процесса.

Модели полевого опыта. При их реализации природный объект используется в качестве полигона для эксперимента. Этот путь весьма широко реализуется и в России, и за рубежом, часто в виде модели «черного ящика». К таким моделям относятся опыты с запуском всевозможных индикаторов (красители, изотопы, растворенные и взвешенные вещества и пр.), фильтрационные эксперименты (откачки, наливов, наблюдения в пещерах над инфильтрационной и конденсационной капелью и пр.), а также трассирования подземных вод в Крыму на массивах развития природного карста (Рис. 1) и участках урбанизированных территорий с антропогенной активизацией карстовых процессов (г. Симферополь). В 80-е годы прошлого столетия модель полевого опыта изучалась на обвальноподпрудном озере Амткеле (Зап. Кавказ), она представляет собой полевую модель высотной гидротехнической плотины и водохранилища на горно-карстовых территориях [15].

Иногда полевые опыты по изучению фильтрации, конденсации, химического состава и агрессивности карстовых вод проводятся при воднобалансовых исследованиях [10, 17]. Интересные полевые опыты продолжительностью 5 лет были проведены [18] на береговых обнажениях Камского водохранилища. По наблюдениям за модельными глыбами скорость растворения здесь достигает 0,5-1,0 кг/м²сут. С 1978 г. международный полевой эксперимент проводится Комиссией карстовой денудации Международного спелеологического союза. Опыт в Крыму продолжается и ныне. Стандартные известняковые пластинки, выпиленные из керна, закладываются в почвенный слой на различную глубину. Их взвешивание производится через год. В России этот эксперимент также проводится на Кавказе и Саянах.

Модель – производственный эксперимент часто реализуется при сооружении ГЭС [19], строительстве гидроэнергетических и транспортных тоннелей, строительстве и эксплуатации дорог и карьеров. Получаемые при этом данные о растворимости карстующихся пород, их устойчивости к провалам, способности воспринимать статические, динамические нагрузки и вибрацию, устойчивости к размыву заполнителя трещин представляют огромный теоретический интерес.

Лабораторное моделирование. Лабораторное моделирование с одинаковой субстанционной основой. Большинство моделей воспроизводит ход процесса карстования или антропогенной активизации карста. В России одна из первых

установок такого рода описана в работе [20]. Проводились эксперименты с порошком известняка. Проводился эксперимент в двух модификациях – с доломитовой мукой в обычной фильтрационной установке и с пластинками известняка [21].

Цикл интересных лабораторных экспериментов с пришлифованными пластинками различных по структуре и химическому составу известняков описан в работах [3, 22]. Площадь поверхности искусственных трещин составляла $3 \times 5 \text{ см}^2$, раскрытие – 0,1–0,2 мм, скорость движения воды – 0,02–1,00 см/с, градиент напора – 0,2–0,8, температура воды – 20°C , продолжительность опыта – 83 дня. Ежедневно фиксировались температура и содержание O_2 в воздухе и воде, pH подаваемой воды и фильтра, давление воздуха и градиент напора, объем фильтрата, содержание в фильтрате Ca и Mg. Установлено, что с увеличением скорости движения воды (V , см/с) содержание CaCO_3 в растворе (A , мг/л) уменьшается ($A = 5,9V^{-0,31}$). Однако увеличение скорости движения (а следовательно, и объема фильтрата) влечет за собой увеличение коррозионного раскрытия трещин (M , мг/см²·с). Для группы экспериментов между V и M существует четкая связь, выражающаяся уравнением

$$M = 2 \cdot 10^{-7} + 1,4 \cdot 10^{-5} V^{1,4} \quad (1).$$

В работе установлен интересный факт закупорки узких трещин коллоидными частицами и продуктами жизнедеятельности бактерий. Необходимо отметить, что полученные результаты характеризуют скорость растворения стенок трещин. Сравнить результаты этих экспериментов с данными о скорости химической денудации карстовых массивов некорректно [12].

P. Curl [23] провел модельное изучение процесса расширения трещинных полостей в известняках под влиянием конвекции. Несколько позже «чистая» коррозионная модель была применена для изучения закономерностей развития карстовых шахт [24].

A. Howard и B. Howard [25] изучали процесс коррозионного расширения трещины на двух плитах известняка. Через трещину пропускалась под напором дистиллированная вода, насыщенная при парциальном давлении CO_2 , равном атмосферному

$$pp'm/x = 0,0508Qy^{-0,4} \quad (2),$$

$$ppm = 8,2(1 - e^{-4,04 \cdot 10^{-2}x}) \quad (3),$$

где: ppm – содержание ионов Ca в воде, мг; x – расстояние по длине потока, см; Qy – расход на единицу ширины трещины, см²/с.

Minganti С. и др. [26] провели интересный опыт по моделированию коррозионной активности ламинарных потоков. Цилиндрический образец известняка помещался в сосуд с водой, установленный на центрифуге. При изменении скорости ее вращения от 8 до 28 рад/с менялась площадь смоченной

поверхности образца и количество CaCO_3 , перешедшее в раствор. Этот эксперимент имеет больше методическое значение.

Разработана оригинальная «лабораторная модель карстового процесса». Она принципиально отличается от всех известных моделей тем, что «карстующаяся поверхность» получается напылением известняковой крошки определенного гранулометрического и химического состава на клеевую основу, в свою очередь нанесенную на металлическую основу. Модель предусматривает значительную длину путей фильтрации (5–8 км для инфильтрационного, 3–5 км для инфлюационного потока), контролируемый газовый состав воздуха внутри модели, поддержание исходной минерализации воды на заданном уровне, соответствующем минерализации дождевых или талых снеговых вод, контролируемые скорости движения воды, возможность моделирования слияния двух потоков в вадозной и фреатической зонах и пр.

Известны модельные эксперименты с карбонатными породами, воспроизводящие форму возникающих пустот. I. Watts и I. Trudgill [27] изучали форму желобков выщелачивания, возникающих при стекании раствора по плиткам известняка 13x22 см с разным уклоном. В качестве растворителя использовалась 1 % HCl. Установлено, что при углах до 15° преобладает плоскостной, а более 15° – струйчатый сток.

Лабораторное моделирование с неодинаковой субстанционной основой. Чаще всего применяется для моделирования поверхностных и подземных форм, возникающих вследствие карстовых деформаций, растворения, действия сконцентрированных потоков. Известно более 1000 экспериментов на модели с диаметром основания 800 мм и высотой засыпки песка 600–700 мм [28, 29, 12]. При разных гидродинамических давлениях и скоростях потока получено несколько форм устойчивых полостей: каплевидная, спиралеобразная, грибовидная, столбообразная, смерчевидная, лепестковая, сложная. Полагают, что по аналогии эти данные можно использовать для выяснения закономерностей формирования карстовых полостей. Однако эти выводы недостаточно корректные, так как нельзя заменять растворимые скальные и полускальные породы, в которых формируются карстовые полости, рыхлыми нерастворимыми породами.

При моделировании карстовых провалов в условиях покрытого карста используются плоские стенды, фильтрационные приборы [30].

Проводились опыты с песками различного гранулометрического состава в ящиках, дно которых состояло из щитков с различной величиной отверстий, имитирующих карстовые пустоты [5].

Воспроизводилась на модели динамика обрушения и оседания песчаной толщи мощностью в натуре 50 м над полостью с поперечным сечением 50 м^3 [31].

Коррозионные процессы, обвалы сводов карстовых пустот и формирование карстовых брекчий успешно моделируются в специальных фильтрационных приборах [32, 26].

Kent и Ross A. [33] и Ewers R. [1, 34] поставили ряд тонких экспериментов на пластинках прессованного гипса и соли, уложенных в фильтрационный прибор.

Напор создавался через точечный ввод. Серия последовательных фотоснимков воспроизводит рост карстовых каналов, происходящий нормально по отношению к линиям равных наповов. Под влиянием случайно возникающего в зоне местной анизотропии образца главного канала происходит искривление гидроизогипис. В конце опыта весь сток сосредоточивается в главном канале, а вторичные каналы постепенно отмирают (Рис. 4).

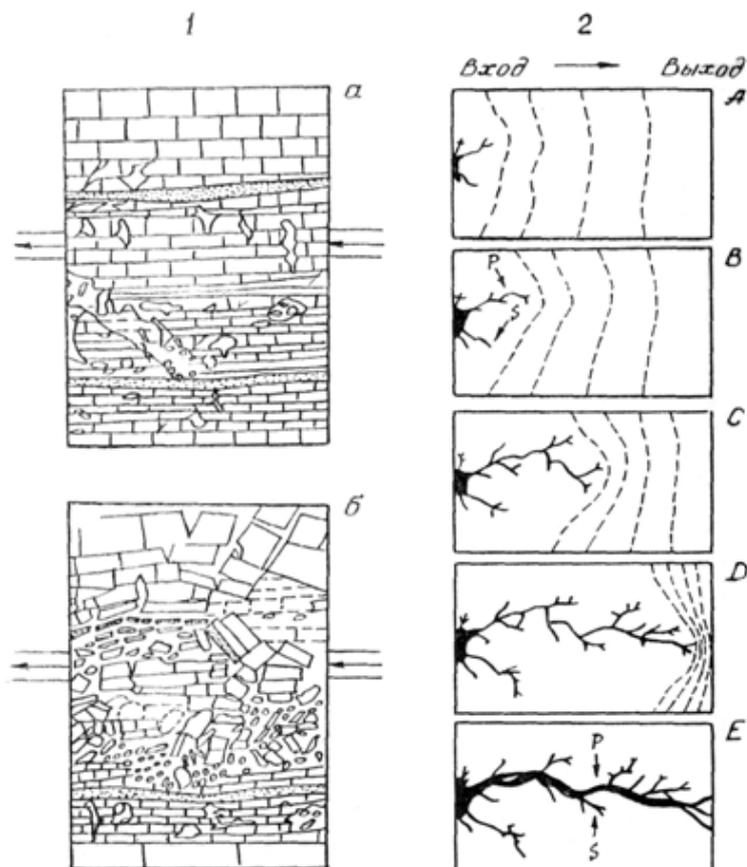


Рис. 4. Лабораторные модели в карстологии. 1 – образование пещеры (1а) и формирование карстовой брекчии (1б) после разрушения пещеры; 2 – развитие главного (P) и вторичного (S) карстовых каналов. Пунктиром показаны гидроизопьезы.

Watson R. [35] и Лехов А. В. [8] рассмотрели ограничения, возникающие при экспериментальном моделировании химических реакций. Основное из них – это невозможность изменения масштаба времени. Использование для этих целей концентрированных кислот, центрифуг и других приемов порождает новые проблемы (определение степени эквивалентности и масштаба подобия). Поэтому для

моделирования карстовых процессов часто используются гидравлические установки и электро-аналоговые устройства. Удачную гидравлическую модель из серии сообщающихся трубок создал Кауе G. [32]. По его данным скорость растворения их стенок пропорциональна скорости потока. Это определяет «выделение» нескольких более крупных трубок, из которых и развиваются за счет всех остальных главные каналы пещер. Интересные идеи о применении в карстологии гидравлических установок и гидроинтеграторов содержатся в работах [36, 37].

Электрические аналоговые установки и компьютерные программы широко используются для моделирования гидрогеологических условий трещинно-карстовых массивов [38, 39] (Рис. 5). Для решения задач карстологии эти методы пока применяются редко, хотя дают очень интересные результаты.

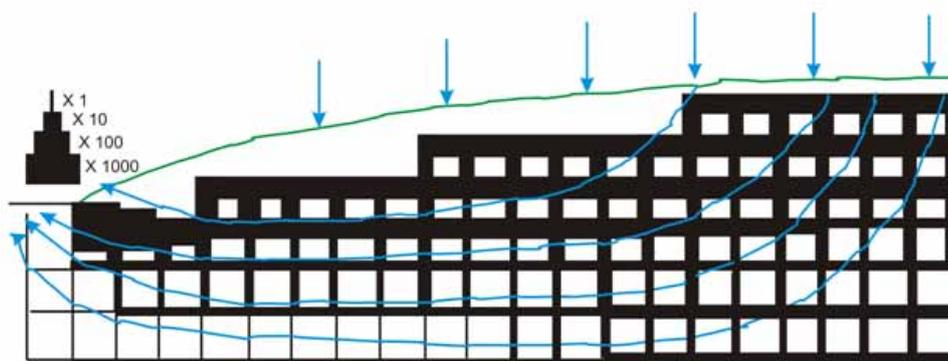


Рис 5. Диаграмма, показывающая относительное растворение известняков при движении от области питания к области разгрузки.

Ewers R. [40] провел электромоделирование для граничных условий точечной и линейной разгрузки при разных расстояниях между областями питания и разгрузки и разной «плотности» точечных пунктов питания. Лехов А. В. [8] провел теоретическое исследование карстового массива в единичной трещине. Он показал, что аналитическое решение системы уравнений баланса масс пока возможно только для двух режимов растворения – чисто диффузного и кинетического, при постоянстве расхода напоров при входе и выходе трещин. Последнее условие способствует более быстрому и равномерному по длине коррозионному раскрытию трещин.

Анализ литературы по проблеме моделирования свидетельствует о необходимости продолжения исследований в этом направлении. Большинство моделей, используемых в карстологии, воспроизводит одно-два из четырех основных условий развития карста. В этом отношении часто крайние позиции занимают сторонники математического моделирования, отрицающие

необходимость развития других его направлений. При постановке работ по моделированию и оценке их результатов, особенно на закарстованных антропогенно активизированных территориях, следует учитывать порядок величины исследуемого объекта и степень его проницаемости [41] (Рис. 6). При изучении карстовых процессов и возникающих при этом форм в лаборатории исследователь сталкивается в основном с влиянием пористости и микротрещиноватости объекта; при экспериментах на натуральных объектах следует учитывать влияние макротрещиноватости и целых карстовых водоносных систем.

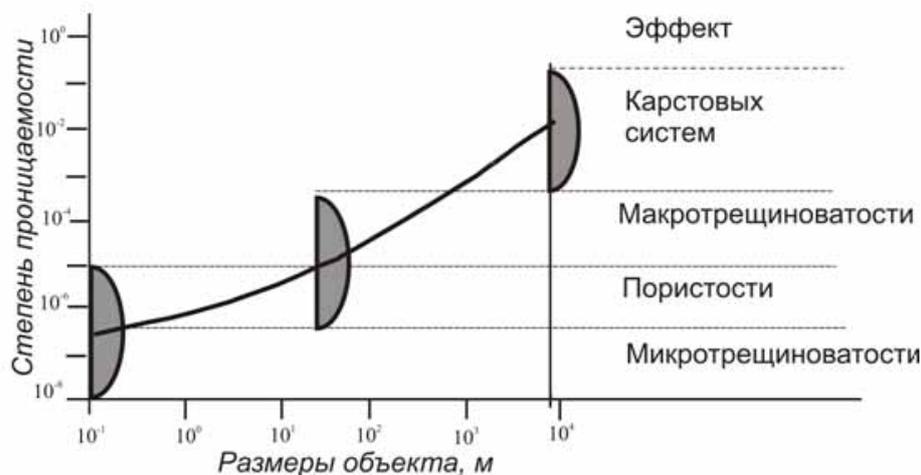


Рис. 6. Влияние различных эффектов на прохождение карстовых процессов в зависимости от размеров и проницаемости изучаемых объектов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в зависимости от масштаба модели изучаются отдельные звенья блок-схемы карстового процесса, взаимосвязанная группа этих звеньев или весь процесс в целом, но без очень важных для понимания его хода деталей. В этом – основная причина противоречивости результатов модельных экспериментов в карстологии. Противоречивость результатов, полученных на различных по теоретическим признакам, конструкции, используемым материалам и поставленным граничным условиям моделях, настоятельно требует создания единого методического центра по моделированию карстовых процессов и форм в инженерно-геологических и гидрогеологических целях, обобщению и обработке полученных материалов, особенно для крупных урбанизированных территорий с антропогенной активизацией карста. В зависимости от целей и задач исследований следует применять в различных сочетаниях все существующие методы мысленного и материального моделирования, не отдавая предпочтения любому из них как

наиболее совершенному.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Совета Министров Республики Крым в рамках научного проекта № 16-45-910583, код р_а.

Список литературы

1. Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W. Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville: National Speleological Society, Inc., 2000. 527 p.
2. Дублянский В. Н. Проблема спелеогенеза // Вопросы общего и регионального карстоведения. М.: МГУ, 1977. С. 23–28.
3. Абашидзе Е. М. Методика изучения выщелачивания карбонатных пород в районе Шаорского водохранилища // Методика изучения карста. 1963. Вып. 2. С. 12–16.
4. Короткевич Г. В. Некоторые генетические особенности карстовых форм областей закрытого карста // Тезисы докладов на совещании по изучению карста. 1956. Вып. 10. С. 28–29.
5. Лукин В. С. Провальные явления на Урале и в Предуралье // Труды Института геологии. 1964. Вып. 69. С. 34–37.
6. Margin A. Les systemes karstoques et leur methologie investigation // Annales scientifiques de l'Universite de Besancon. 1976. V. 25. pp. 121–129.
7. Дедков А. П., Мозжерин В. И., Ступишин А. В., Трофимов А. М. Климатическая геоморфология денудационных равнин. Казань: Издательство Казанского университета, 1977. 185 с.
8. Лехов А. В., Шмагин Б. А. Системный подход к изучению формирования проницаемости карбонатных пород // Материалы III научной конференции аспирантов и молодых ученых Геологического факультета МГУ. Гидрогеология. М.: ВИНТИ, 1976. С. 11–15.
9. Палиенко В. П., Борщевский М. Е., Вахрушев Б. А. и др. Морфоструктурно-неотектонический анализ территории Украины. Киев: Наукова думка, 2013. 263 с.
10. Дублянский В. Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. М. – Л.: Наука, 1977. 183 с.
11. Дублянский В. Н., Вахрушев Б. А., Цындук А. Г., Шипунова В. А. Проблема моделирования в карстологии // Моделирование геосистем для рационального природопользования. Кишинев: Штиинца, 1988. С. 16–18.
12. Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей // Тезисы докладов научно-технического семинара. Пермь: Издательство Пермского университета, 1979. 110 с.
13. Карст Средней Азии и горных стран // Тезисы докладов всесоюзного совещания. Ташкент: Узбекгидрогеология, 1979. 189 с.
14. Розовский Л. Б. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса: ОГУ, 1975. 194 с.
15. Вахрушев Б. А., Гигинейшвили Г. Н., Дублянский В. Н., Цвят А. Л. Гидрология и палеогидрология Амткельского карстового района // Труды географического общества Грузинской ССР. 1990. Т. XVIII. С. 31–39.
16. Lu Yaoru, Jie Xianyi, Zhang Sanlin. The development of karsts in China and some of its hydrogeological and engineering geological conditions // Acta Geologica Sinica. 1973. № 1. pp. 112–119.
17. Jenning J. N. Limestone solution on bare karst and covered karsts compared // BCRA. 1978. № 4. pp. 78–87.
18. Печеркин И. А. Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Пермь: Издательство Пермского университета, 1969. 152 с.
19. Семенов М. П., Орадовская А. Е., Храмогина Т. С. и др. Исследования размываемости трещиноватых горных пород и заполнителя трещин фильтрационным потоком // Труды лаборатории инженерной гидрогеологии. М.: Госстройиздат, 1957. С. 43–48.
20. Асташев А. Установка для исследования процессов карстования // Новости техники. 1932. № 92.

- С. 17–22.
21. Родионов Н. В. Опыты воспроизведения некоторых карстовых форм в лабораторных условиях // Тезисы докладов на совещании по изучению карста. 1956. Вып. 8. С. 29–30.
 22. Абашидзе Е. М. Некоторые результаты экспериментальных исследований карстовых процессов // Пещеры Грузии. 1978. Вып. 7. С. 16–23.
 23. Curl R. Cavity conduit enlargement by natural convection // Cave Notes. 1966. № 8. pp. 210–218.
 24. Reinboth F. Untersuchungen zum Problem der Höhlenbildung im Gyps // Mitteilungen Verband der Deutschen Höhlen und Karstforscher. 1974. № 3. pp. 21–31.
 25. Howard A. Solution of limestone under Laminar flow between parallel boundaries // Caves and Karst. 1967. № 4. pp. 29–34.
 26. Mignanti C. Methods of determination of Laminar flows effects on cave development processes // Proceedings of the 7th International Speleological Congress. Bridgewater: British Cave Research Association, 1977. pp. 97–105.
 27. Miller P. Pure corrosive Model of the developments of vertical karsts-shafts // Symposium on Karst-morphogenesis. Szeged, Hungary: Faculty of Science at Attila Jozsef University, 1973. pp. 45–50.
 28. Архидьяконских Ю. В. Опыты моделирования суффозионных воронок и возможность использования их при изучении карстовых колодцев и шахт // Пещеры. 1971. Выпуск 10–11. С. 22–27.
 29. Максимович Г. А. О моделировании спиральных полостей // Пещеры. 1974. Выпуск 14–15. С. 8–13.
 30. Давыдько Р. Б. Моделирование деформаций рыхлых толщ пород над карстовыми полостями // Инженерные изыскания в строительстве. 1977. Вып. 6 (59). С. 34–37.
 31. Бастраков Г. В. Опыт моделирования деформаций обрушения и оседания песчаных толщ над подземными полостями // Инженерные изыскания в строительстве. 1972. № 4 (16). С. 30–35.
 32. Kaye G. A. The effect of solvent Motion on Limestone solution // Journal Geology. 1957. Vol. 65. pp. 54–61.
 33. Kendt D., Ross A. Simulation of cavern formation and karst development using salt // Journal of Geological Education. 1975. Vol. 23. № 2. pp. 56–59.
 34. Ewers R. O. A model for development of Broad scale networks of groundwater from in steeply dipping carbonate aquifer // BCRA. 1978. № 2. pp. 25–29.
 35. Watson R. A. Limitation on substituting chemical reactions in model experiments // Z. Geomorphol. 1974. № 3. pp. 21–24.
 36. Турышев А. В. Гидродинамические и гидрохимические особенности развития карста в карбонатных и сульфатных породах // Проектирование и эксплуатация земляного полотна в карстовых районах. М.: Транспорт, 1968. С. 28–31.
 37. Турышев А. В. Некоторые вопросы изучения палеогидрогеологических условий карстовых областей в природной обстановке и путем лабораторных экспериментов // Методика палеогидрогеологических исследований. Ашхабад: Управление геологии Совета Министров ТССР. Институт геологии, 1970. С. 103–105.
 38. Бабушкин В. Д. Основные положения методики моделирования гидрогеологических условий карстовых массивов // Прогноз водопритоков в горные выработки и водосборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. М.: Недра, 1972. С. 29–32.
 39. Мокрик Р. В. К вопросу о воспроизведении гидрогеологических условий карстовых массивов на математических моделях // Закономерности формирования и особенности региональной оценки эксплуатационных запасов подземных вод Прибалтики. Вильнюс: Моклас, 1979. С. 7–10.
 40. Ewers R. O. A model for the development of subsurface drainage routes along bedding planes // VI Congress International Speleology. 1977. № 3. pp. 72–75.
 41. Burger A. Hydrogeology of karstic terrains. Paris: International Association of Hydrogeologists, 1975. 190 p.

MODELING OF KARST PROCESS IN THE CONDITIONS OF ECONOMIC DEVELOPMENT AND HUMAN-INDUCED INTENSIFICATION OF KARST

Vakhrushev B. A., Vakhrushev I. B.

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
E-mail: vakhb@inbox.ru*

Karst process and the resulting phenomena have a complex spatial, morphological, temporal and dynamic structure. Furthermore, the karst in their development includes mechanisms paragenetic interactions, initiating gravitational, suffosion-subsidence, landslides, erosion and other negative engineering-geological processes. In this regard, the complexity of the study of karst in natural conditions, the unpredictability of his behavior (including paragenetic and related phenomena) under anthropogenic impact and the need to give engineering geological prognosis of the situation has led to increasingly use kartofelny modeling techniques [1].

In this work the analysis of the main modeling methods in kartofelny that can be used for the evaluation of cartapesta and human-induced intensification of karst.

Studies show that most models reproduce the karst process one or two conditions development of karst. There are big differences in the simulation results associated with the models built on different theoretical signs, designs, used materials equivalent to the set boundary conditions etc. This situation necessitates the creation of a single methodological center for the simulation of karst processes and forms in engineering geological, hydrogeological purposes, the creation of a database with subsequent synthesis and processing of the obtained results. Especially these problems are actual for the Republic of Crimea, where more than 80% of the territory is occupied carthusiana breeds, exposed to intense anthropogenic impact.

All modeling methods used in domestic and foreign\ kartofelny can be divided into two large groups: mental, unifying theoretical construct, and the material, where the process or phenomenon reproduced on the objects found in nature (in situ simulation) or special models (laboratory simulation).

Keywords: karst modeling, human-induced intensification of karst, cortopassi.

References

1. Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W. Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville: National Speleological Society, Inc. (Publ.), 2000, 527 p. (in English).
2. Dublyanskij V. N. Problema speleogeneza (Problem speleogenesis) // Voprosy obshchego i regional'nogo karstovedeniya. Moscow: MGU (Publ.), 1977, pp. 23–28. (in Russian).
3. Abashidze E. M. Metodika izucheniya vyshchelachivaniya karbonatnyh porod v rajone SHAorskogo vodohranilishcha (Methodology of the study of leaching of carbonate rocks in the area Shorskogo reservoir) // Metodika izucheniya karsta, 1963, V. 2, pp. 12–16. (in Russian).
4. Korotkevich G. V. Nekotorye geneticheskie osobennosti karstovyh form oblastej zakrytogo karsta // Tezisy dokladov na soveshchaniy po izuchenyu karsta, 1956, V. 10. pp. 28–29. (in Russian).
5. Lukin V. S. Proval'nye yavleniya na Urale i v Predural'e (Failure phenomena in the Urals and in the Urals) // Trudy Instituta geologii, 1964, V. 69. pp. 34–37. (in Russian).

6. Margin A. Les systemes karstoques et leur methologie investiqation // Annales scientifiques de l'Universite de Besancon, 1976, V. 25, pp. 121–129. (in France).
7. Dedkov A. P., Mozzherin V. I., Stupishin A. V., Trofimov A. M. Klimaticheskaya geomorfologiya denudatsionnyh ravnin (Climatic geomorphology denudation plains). Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta (Publ.), 1977, 185 p. (in Russian).
8. Lekhov A. V., Shmagin B. A. Sistemnyj podhod k izucheniyu formirovaniya pronitsaemosti karbonatnyh porod (Systematic approach to the study of the formation permeability of carbonate rocks) // Materialy III nauchnoj konferentsii aspirantov i molodyh uchenyh Geologicheskogo fakul'teta MGU. Gidrogeologiya. Moscow: VINITI (Publ.), 1976, pp. 11–15. (in Russian).
9. Palienko V. P., Borshchevskij M. E., Vahrushev B. A. i dr. Morfostrukturno-neotektonicheskij analiz territorii Ukrainy (Morphostructural-neotectonic analysis of the territory of Ukraine). Kiev: Naukova dumka (Publ.), 2013. 263 p. (in Russian).
10. Dublyanskij V. N. Karstovye peshchery i shahty Gornogo Kryma (Karst caves and shafts in the Mountain Crimea). Moscow–Leningrad: Nauka (Publ.), 1977. 183 p. (in Russian).
11. Dublyanskij V. N., Vahrushev B. A., Tsynduk A. G., Shipunova V. A. Problema modelirovaniya v karstologii (The problem of modeling in Karstology) // Modelirovanie geosistem dlya ratsional'nogo prirodoopol'zovaniya. Kishinev: Shtiintsa (Publ.), 1988, pp. 16–18. (in Russian).
12. Modelirovanie formirovaniya suffuzionnyh i karstovyh polostej (Modeling of the formation of the suffusion and karst cavities) // Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskogo seminarara. Perm': Izdatel'stvo Permskogo universiteta (Publ.), 1979, 110 p. (in Russian).
13. Karst Srednej Azii i gornyh stran (Karst of Central Asia and mountainous countries) // Tezisy dokladov vsesoyuznogo soveshchaniya. Tashkent: Uzbekgidrogeologiya (Publ.), 1979, 189 p. (in Russian).
14. Rozovskij L. B. Inzhenerno-geologicheskie prognozy i modelirovanie (Geological engineering predictions and modeling). Odessa: OGU (Publ.), 1975, 194 p. (in Russian).
15. Vahrushev B. A., Giginejshvili G. N., Dublyanskij V. N., TSvyat A. L. Gidrologiya i paleogidrologiya Amtkel'skogo karstovogo rajona (Hydrology and paleohydrology Adelskogh karst region) // Trudy geograficheskogo obshchestva Gruzinskoj SSR, 1990, T. XVIII, pp. 31–39. (in Russian).
16. Lu Yaoru, Jie Xianyi, Zhang Sanlin. The development of karsts in China and some of its hydrogeological and engieneering geological conditions // Acta Geologica Sinica, 1973, no 1. pp. 112–119. (in English).
17. Jenning J. N. Limestone solution on bare karst and covered karsts compared // BCRA, 1978, no 4, pp. 78–87. (in English).
18. Pecherkin I. A. Geodinamika poberezhij Kamskih vodohranilishch (Geodynamics of the Kama reservoirs). Perm': Izdatel'stvo Permskogo universiteta (Publ.), 1969, 152 p. (in Russian).
19. Semenov M. P., Oradovskaya A. E., Hramogina T. S. i dr. Issledovaniya razmyvaemosti treshchinovatyh gornyh porod i zapolnitelya treshchin fil'tratsionnym potokom (Research razbivaemysya fractured rocks and of the filler with the filter flow) // Trudy laboratorii inzhenernoj gidrogeologii. M.: Gosstrojizdat (Publ.), 1957, pp. 43–48. (in Russian).
20. Astashev A. Ustanovka dlya issledovaniya protsessov karstovaniya (Installation for research of processes of cestovaniye) // Novosti tekhniki, 1932, no 92, pp. 17–22. (in Russian).
21. Rodionov N. V. Opyty vosproizvedeniya nekotoryh karstovyh form v laboratornyh usloviyah (Experiments playing some karst forms in laboratory conditions) // Tezisy dokladov na soveshchanii po izucheniyu karsta, 1956, V. 8, pp. 29–30. (in Russian).
22. Abashidze E. M. Nekotorye rezul'taty eksperimental'nyh issledovaniy karstovyh protsessov (Some results of experimental researches of karst processes) // Peshchery Gruzii, 1978, V. 7, pp. 16–23. (in Russian).
23. Curl R. Caye conduit entlargement by natural conyection // Cave Notes, 1966, no 8, pp. 210–218. (in English).
24. Reinboth F. Untersuchungen zum Problem der Hohlenbildund im Gyps // Mitteilungen Verband der Deutschen Höhlen und Karstforscher, 1974, no 3, pp. 21–31. (in Germany).
25. Howard A. Solution of limnestone under Laminar flow between parallel bundaries // Cayes and Karst, 1967, no 4, pp. 29–34. (in English).
26. Migganti C. Metods of determination of Laminar flows effects on cave development processes // Proceedings of the 7th International Speleological Congress. Bridgwater: British Cave Research

- Association, 1977, pp. 97–105. (in English).
27. Miller P. Pure korrosive Model of the developments of vertical karsts-shafts // Symposium on Karst-morphogenesis. Szeged, Hungary: Faculty of Science at Attila Jozsef University, 1973, pp. 45–50. (in English).
 28. Arhid'yakonskih YU. V. Opyty modelirovaniya suffozionnyh voronok i vozmozhnost' ispol'zovaniya ih pri izuchenii karstovyh kolodtsev i shaht (Experiments modeling of suffosion funnels and the ability to use them in the study of karst wells and mines) // Peshchery, 1971, Vypusk 10–11, pp. 22–27. (in Russian).
 29. Maksimovich G. A. O modelirovanii spiral'nyh polostej (Modeling of helical cavities) // Peshchery, 1974, Vypusk 14–15, pp. 8–13. (in Russian).
 30. Davyd'ko R. B. Modelirovanie deformatsij ryhlyh tolshch poord nad karstovymi polostyami (Modeling of deformation friable strata Board above karst cavities) // Inzhenernye izyskaniya v stroitel'stve, 1977, V. 6 (59), pp. 34–37. (in Russian).
 31. Bastrakov G. V. Opyt modelirovaniya deformatsij obrusheniya i osedaniya peschanyh tolshch nad podzemnymi polostyami (Experience of modeling deformations of the collapse and subsidence of the sandy strata above the underground cavities) // Inzhenernye izyskaniya v stroitel'stve, 1972, no 4 (16), pp. 30–35. (in Russian).
 32. Kaye G. A. The effect of solvent Motion on Limestone solution // Journal Geology, 1957, Vol. 65, pp. 54–61. (in English).
 33. Kendt D., Ross A. Simulation of cavern formation and karst development using salt // Journal of Geological Education, 1975, Vol. 23, no 2, pp. 56–59. (in English).
 34. Ewers R. O. A model for development of Broad scale networks of groundwoter from in steeply dipping carbonate aguiter // BCRA, 1978, no 2, pp. 25–29. (in English).
 35. Watson R. A. Limitation on substitutiong chemical reactions in model ekhperiments // Z. Geomorfol, 1974, no 3, pp. 21–24. (in English).
 36. Turyshchikov A. V. Gidrodinamicheskie i gidrohimicheskie osobennosti razvitiya karsta v karbonatnyh i sul'fatnyh porodah (Hydrodynamic and hydrochemical characteristics of the development of karst in carbonate and sulfate rocks) // Proektirovanie i ekspluatatsiya zemlyanogo polotna v karstovyh rajonah. Moscow: Transport (Publ.), 1968, pp. 28–31. (in Russian).
 37. Turyshchikov A. V. Nekotorye voprosy izucheniya paleogidrogeologicheskikh uslovij karstovyh oblastej v prirodnoj obstanovke i putem laboratornyh eksperimentov (Some questions of studying paleohydrogeology conditions of the karst areas in the environment and by laboratory experiments) // Metodika paleogidrogeologicheskikh issledovanij. Ashkhabad: Upravlenie geologii Soveta Ministrov TSSR. Institut geologii (Publ.), 1970, pp. 103–105. (in Russian).
 38. Babushkin V. D. Osnovnye polozeniya metodiki modelirovaniya gidrogeologicheskikh uslovij karstovyh massivov (Main provisions of the methodology of modeling of hydrogeological conditions of the karst massifs) // Prognoz vodopritokov v gornye vyrabotki i vodosbory podzemnyh vod v treshchinovatyh i zakarstovannyh porodah. Moscow: Nedra (Publ.), 1972, pp. 29–32. (in Russian).
 39. Mokrik R. V. K voprosu o vosproizvedenii gidrogeologicheskikh uslovij karstovyh massivov na matematicheskikh modelyah (To the question about playing the hydrogeological conditions of the karst massifs in mathematical models) // Zakonomernosti formirovaniya i osobennosti regional'noj otsenki ekspluatatsionnyh zapasov podzemnyh vod Pribaltiki. Vil'nyus: Mokslas (Publ.), 1979, pp. 7–10. (in Russian).
 40. Ewers R. O. A model for the development of subsurface drainage routes along bedding planes // VI Congress International Speleology, 1977, no 3, pp. 72–75. (in English).
 41. Burger A. Hydrogeology of karstic terrains. Paris: International Association of Hydrogeologists (Publ.), 1975. 190 p. (in English).